

金属包覆有机聚合物波导色散特性的实验研究*

周 骏** 曹庄琪 陈英礼 陈益新

(上海交通大学应用物理系光学与光子学研究所, 上海 200030)

张向阳 刘举正

(东南大学化学工程系, 南京 210096)

摘 要 采用角度扫描衰减全反射(ATR)技术,对银金属膜包覆的 DR-1/PMMA 型有机聚合物波导的色散特性进行了实验研究,从各波长下衰减全反射共振吸收峰的位置和半宽度确定了波导相应模式的传播常数,实验结果与理论计算符合较好,说明银膜介电常数的虚部可作为微扰小量处理。

关键词 衰减全反射, 金属包覆波导, 有机聚合物, 色散特性。

1 引 言

金属在可见光和近红外区域具有复数介电系数且实部为较大负值的特性使得金属包覆介质波导在光学特性上与一般的全介质波导有显著的差别,特别是利用金属包覆介质波导的光学特性制作的偏振器和模式滤除器等集成光学器件在光通信系统中得到了广泛应用,因而人们一直在进行深入研究^[1~4]。另一方面,由于有机聚合物材料具有较强的光学非线性性质、较高的损伤阈值和容易成形等优点,具有能制作集成光学器件的潜在应用前景,特别是十分容易制成薄膜,最适合在波导型器件中使用,这越来越受到人们的关注^[5~7]。因此,实验上研究金属包覆有机聚合物波导的光学特性,无论对导波光学理论还是对有关器件的设计和制作都具有实际的意义。

本文采用有机聚合物 4-[N-乙基[-N-(2-羟基烷)]氨基-4'-硝基偶氮苯(DR-1)接枝在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)中,组成共聚物材料,涂布在银膜上制成单面金属包覆有机聚合物光波导,利用角度扫描衰减全反射技术^[8],在可见光范围内 4 种波长下对该波导 TE 与 TM 导模(TM₀表面模比较特殊,另文讨论)的衰减全反射共振吸收特性进行了实验研究,进而获得了该波导的色散特性,实验结果与理论计算符合较好,说明文献[9]将金属介电常数的虚

* 上海市科技发展基金资助。

** 现在通讯地址: 山东泰安山东矿业学院基础部(271019)。

收稿日期: 1995 年 7 月 26 日; 收到修改稿日期: 1995 年 11 月 6 日

部看作微扰小量是可行的。

2 实 验

2.1 样品制备

在实验中使用的 DR-1/PMMA 共聚物材料的化学结构式如图 1 所示,它是按如下方式制备的:首先将 DR-1/PMMA 与甲苯溶剂按 5 wt% 配制,待其充分溶解后,将整个样品溶液用自旋涂布方法涂覆在镀有金属银膜的 ZF₇ 玻璃棱镜上,最后将有机聚合物薄膜在 80°C 下烘 60 min 除去甲苯溶剂,即制成了棱镜耦合的单面金属包覆有机聚合物波导(如图 2 所示)。实验样品中的银膜,是采用真空蒸镀法制备在棱镜底面上的:首先将棱镜分别浸泡于 1 号和 2 号清洗液(自配)中,煮沸后自然冷却,并超声清洗,然后再用去离子水煮沸,冷却烘干后放入 2.666×10^{-3} Pa 的真空中蒸镀银膜,蒸镀速率约 2 nm/s。

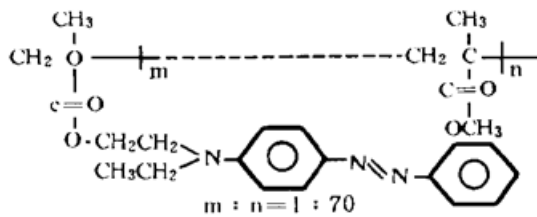


Fig. 1 Chemical structure of DR-1/PMMA

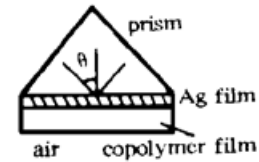


Fig. 2 Sample configuration

这里需要指出,有机聚合物薄膜的折射率与偶氮染料的聚合度有关,薄膜厚度与甩胶机的转速和溶液的粘稠度有关。测得薄膜样品的厚度及在各波长下的线性折射率列于表 1 中^[10]。

Table 1 The measured values of the refractive indices and the thickness of the films

wavelength λ (nm)	514.5	632.8	670	780
refractive indices n	1.545	1.533	1.530	1.525
thickness of film w (μm)	1.35			

2.2 实 验

实验采用角度扫描衰减全反射方法。当波长为 λ 的单色平面波入射到如图 2 所示的棱

镜耦合波导结构上,入射角 θ 大于临界全反射角 θ_c 时,在棱镜介质-金属界面发生全反射。继续增大入射角,使得入射光在棱镜内沿平行界面的波矢分量与波导结构中的导模波矢的 z 分量满足相位匹配条件时,入射光能量通过金属层中的透射迅衰场耦合到波导中激发出导模,则反射光强大大减弱,从而反射率曲线 $R(\theta)$ 上产生吸收峰,获得与波导中 TE 或 TM 导模相对应的衰减全反射共振吸收峰谱^[11, 12]。

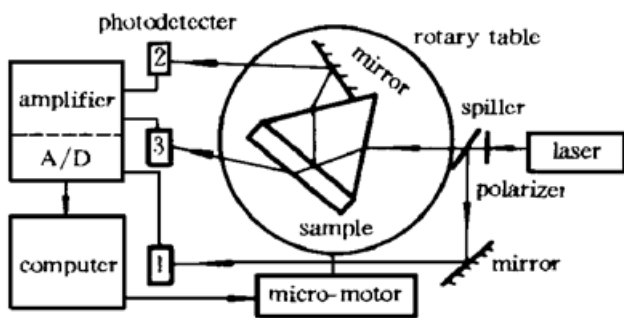


Fig. 3 The experimental setup

实验装置如图 3 所示。分别使用了 Ar⁺ 激光器(514.5 nm), He-Ne 激光器(632.8 nm) 和 半导体激光器(670 nm, 780 nm) 进行实验,分束镜将入射激光束分为两束光,一束偏振光作

为探测光,另一束监视激光器功率稳定情况,探测器 2,3 分别探测经过样品后的反射光强和透射光强,测量透射光强是为了确定 $R(\theta)$ 曲线上全反射临界角 θ 的位置,探测器 1,2,3 的信号都由计算机作数据采集和处理,旋转平台由计算控制。

3 实验结果分析

实验得到的各波长下 TE 与 TM 模的衰减全反射共振吸收峰曲线如图 4 所示。根据金属包覆波导的理论对实验结果进行分析,以获得单面金属包覆有机聚合物波导的色散特性。

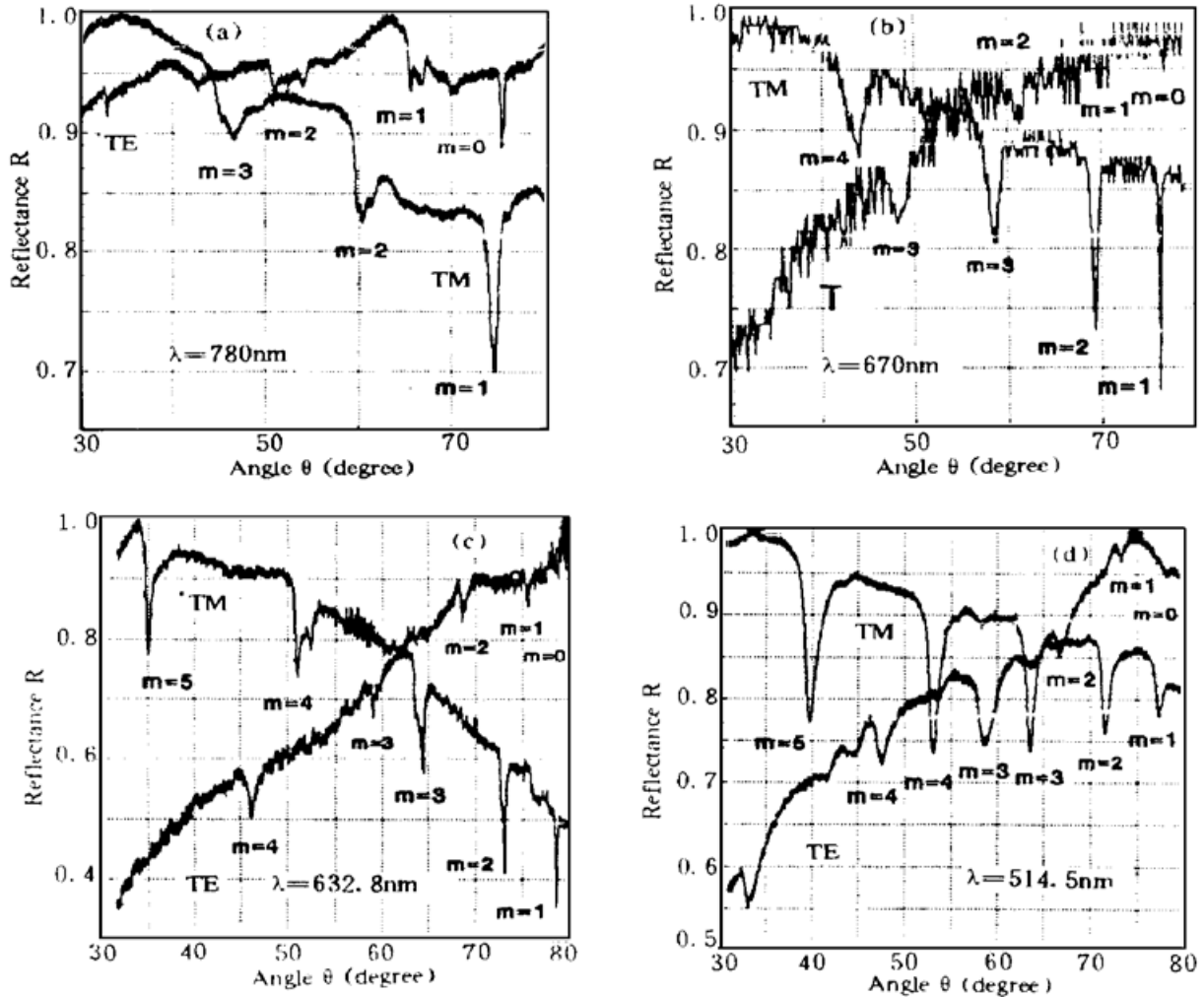


Fig. 4 The experimental curves of $R-\theta$ for the incident p-polarized (TM) and s-polarized (TE) lights

对于图 2 所示的棱镜耦合单面金属包覆波导结构,其模式本征方程可以写成^[9]:

$$kw = m\pi + \mathcal{Q}_2 + \mathcal{Q}_3, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} \mathcal{Q}_2 = \tan^{-1}(p/k), & \mathcal{Q}_3 = \tan^{-1}(q/k), \text{ TE modes} \\ \mathcal{Q}_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_1 p}{\epsilon k}\right), & \mathcal{Q}_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_1 q}{\epsilon k}\right), \text{ TM modes} \end{cases} \quad (2)$$

$$k = k_0(\epsilon_1 - N^2)^{1/2}, \quad p = k_0(N^2 - \epsilon_2)^{1/2}, \quad q = k_0(N^2 - \epsilon_3)^{1/2} \quad (3)$$

上式中的 w 为波导层厚度, ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 分别为波导层、空气和银金属的介电系数。在可见光频率范围里, $\epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3$, 且 $\epsilon''_3 < 0$ 和 $|\epsilon'_3/\epsilon'_3| \ll 1$, N 为波导的有效折射率, $k = 2\pi/\lambda$ 。

由于金属的介电系数为复数,本征方程必须在复平面求解,从而使得本征值 N 为复数,记为 $N = N' + iN''$, 则传播常数也为复量 $\beta = \beta' + i\beta''$, 且有 $N = \beta/k_0$ 。考虑到 $|\epsilon''_3/\epsilon'_3| \ll 1$, 所以 N' 作为零阶近似解可以略去复介电系数的虚部 ϵ''_3 而在实数域内求解(1)式得到。而

N'' 是金属包覆波导损耗的反映(由 ϵ'' 引起), 可以通过微扰方法求解, 数值计算表明^[9] $N'' \ll N'$ 。

另一方面, 对于图 2 所示的 Kretschmann^[8] 结构, 如前所述, 入射光与波导中的导模或与金属和有机膜界面上的表面模耦合时, 出现衰减全反射共振吸收峰。因此, 与图 4 中第 m 个导模对应的共振吸收峰最小值的角度 θ_m 就是满足波矢匹配条件的角度。然而, 由于棱镜中入射光平行界面的波矢分量 $K_{ms}^i = k_0 n_p \sin \theta_m$ 是实数, 而导模波矢的 z 分量是复数, 所以只能近似相位匹配 $K_{ms}^i = \text{Re}(K_{ms}^g)$, 即有

$$N'_m = \frac{\beta_m}{k_0} = n_p \sin \theta_m, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \tag{4}$$

图 5(a) 给出了由实验得到的 $N'_m \sim k_0 \omega$ 的色散曲线, 图中实线连结的点(TM 模)和虚线连结的点(TE 模)是忽略 ϵ'' 情况下由(1)式得到的。此外, 图 4 中的各衰减全反射共振吸收峰具有洛仑兹(Lorentz)线型, 峰宽与金属包覆波导的辐射损耗和本征损耗有关, 当两者相近时峰值最小^[13,14]。考虑到 $N'' \ll N'$, 在 $|k\alpha|$ 和 $|\exp(i2\pi\alpha y)|$ 很小的情况下, 有效折射率虚部与吸收峰半宽度的关系可表示成

$$N''_m = \frac{\beta''_m}{k_0} = \frac{1}{2} n_p W_{\theta_m} / \cos \theta_m \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \tag{5}$$

式中 W_{θ_m} 即为与第 m 个导模相对应的吸收峰的半宽度。图 5(b) 是实验所得的 $N''_m \sim k_0 \omega$ 的色散曲线, 图中实线连结的点(TM 模)和虚线连结的点(TE 模)是根据文献[9]中的计算式得到的。从图 5 可见, 实验值与理论计算值符合得较好。

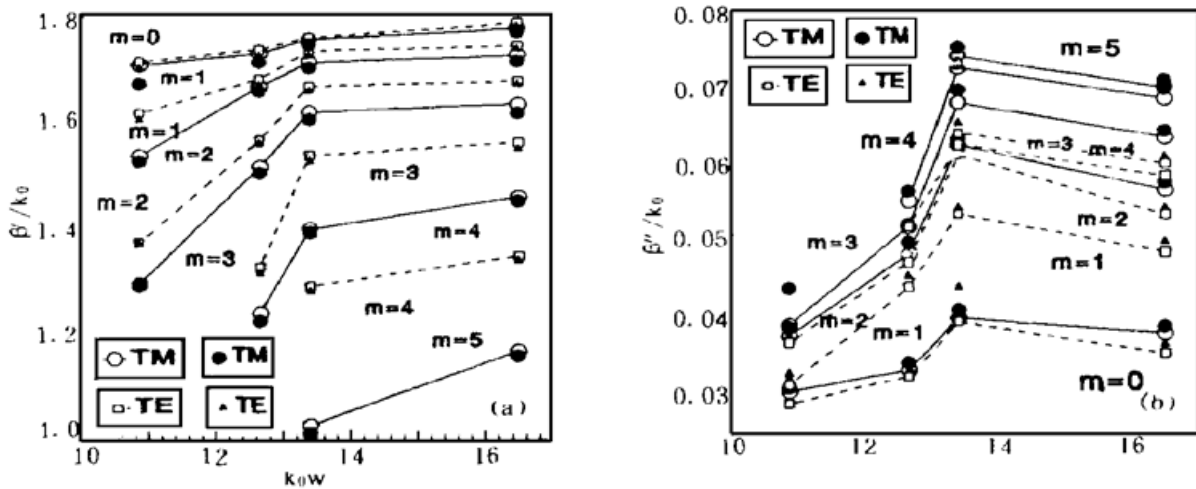


Fig. 5 The experimental values (filled symbols) and calculated values (open symbols) for (a) $\beta'/k_0 \sim k_0 \omega$ (b) $\beta''/k_0 \sim k_0 \omega$

结 论 对于单面金属包覆有机聚合物波导, 其衰减全反射共振吸收峰谱中的各峰均与波导的各个导模相对应, 峰的位置与模的有效折射率实部相关, 峰的宽度与有效折射率的虚部相关, 清楚地反映了波导的模式色散特性。本文的方法还可用于测量金属包覆波导芯区的折射率和厚度, 在文献[10]中作了总结。

本工作得到了李劬教授和沈启舜教授的帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] R. T. Deck, D. Sarid, Enhancement of second-harmonic generation by coupling to long-range surface plasmons. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(12): 1613~ 1617
- [2] 杨傅子, 曹庄琪, 阮丽真等, 金属包覆四层波导结构中的长程表面膜. 光学学报, 1986, **6**(9): 815~ 823
- [3] T. Yu, Y. Wu, Theoretical study of metal-clad optical waveguide polarizer. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(6): 1209~ 1213
- [4] L. Sun, G. L. Yip, Analysis of metal-clad optical waveguide polarizers by the vector beam propagation method. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(6): 1047~ 1050
- [5] M. A. Drury, L. H. Domash, Processing of polymers for nonlinear optical devices. *Proc. SPIE Nonlinear Optics*, 1990, **1220**: 148~ 159
- [6] I. Ledoux, J. Zyss, Nonlinear organic molecules and materials for optoelectronic devices. *Internat. J. Nonlinear Optical Physics*, 1994, **3**(3): 287~ 316
- [7] K. Clays, J. S. Schildkrant, D. J. Williams, Phase-matched second-harmonic generation in a four-layered polymeric waveguide. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(4): 655~ 664
- [8] E. Kretschmann, Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächen-plasmawingungen. *Z. Physik*, 1971, **214**(3): 313~ 324
- [9] S. X. She, Metal-clad multilayer dielectric waveguide: accurate perturbation analysis. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1990, **7**(9): 1582~ 1590
- [10] 仇琳琳, 沈启舜, 曹庄琪等, 低损耗有机聚合物光波导的制备. 上海交通大学学报, 1996, **30**(Sep): 8~ 12
- [11] A. Otto, W. Sohler, Modification of the total reflection modes in a dielectric film by one metal boundary. *Opt. Commun.*, 1971, **3**(2): 254~ 258
- [12] 杨傅子, 曹庄琪, 许政权等, 对称金属包覆介质波导中的表面膜. 光学学报, 1985, **5**(11): 1002~ 1008
- [13] I. Pockrand, Surface plasma oscillations at silver surfaces with thin transparent and absorbing coatings. *Surface Science*, 1978, **72**(3): 577~ 588
- [14] W. P. Chen, J. M. Chen, Surface plasma wave study of submonolayer Cs and Cs-o covered Ag surfaces. *Surface Science*, 1980, **91**(2~ 3): 601~ 617

Dispersion Characteristics of Metal-Clad Organic Polymer Waveguide

Zhou Jun Cao Zhuangqi Chen yingli Chen Yixin

Department of Applied Physics, Institute of Photonics Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

(Received 26 July 1995; revised 6 November 1995)

Abstract The dispersion characteristics of a silver metal-clad organics polymer (DR-1/PMMA) waveguide are experimentaly studied by the angle scanning ATR technology. The mode propagation constants of the waveguide are deteminated from the positions and the half-width of the ATR resonant absorption dip, and the experimental results are consistent with the theoretical calculated values.

Key words ATR (attenuation total reflection) technique, metal-clad waveguide, polymer, dispersion.